

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE
APPLICATION FOR UNITED STATES LETTERS PATENT

Title:

DEVICE AND METHOD FOR HEALTH MONITORING OF AN AREA OF A
STRUCTURAL ELEMENT, AND STRUCTURE ADAPTED FOR HEALTH
MONITORING OF AN AREA OF A STRUCTURAL ELEMENT OF SAID STRUCTURE

Michel Bernard Lemistre

14 bis rue du Chatinay
93190 Livry-gargan
France
Citizen of French Nationality

Dominique Marc Placko

21 allée de la Toison d'Or
94000 Créteil
France
Citizen of French Nationality

Dispositif et procédé de contrôle de l'état de santé d'une
zone d'un élément structurel, et structure adaptée pour un
contrôle de l'état de santé d'une zone d'un élément
structurel de ladite structure

5

DOMAINE TECHNIQUE

La présente invention est relative aux dispositifs et aux procédés de contrôle de l'état de santé d'une zone d'un élément structurel, et à une structure adaptée pour un
10 contrôle de l'état de santé d'une zone d'un élément structurel de cette structure.

ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE

Plus particulièrement, l'invention concerne un dispositif de contrôle de l'état de santé d'une zone d'un
15 élément structurel comprenant au moins un matériau diélectrique de permittivité diélectrique ϵ_r , comprenant :

(A) des moyens d'émission de rayonnement électromagnétique s'étendant dans une direction, ledit champ électromagnétique générant un champ électrique dans
20 la zone, et

(B) des moyens de détection adaptés pour mesurer une première composante mesurée d'un champ électrique, le long d'une première direction de détection.

Les éléments structurels en question sont
25 typiquement des matériaux en résine renforcée par des fibres de verre ou de carbone, faisant partie de la structure, par exemple d'un véhicule tel un véhicule automobile, un aéronef, un véhicule ferroviaire, ou autres, pour lesquels les contraintes de masse sont primordiales.

30 Un tel dispositif a déjà été utilisé avec succès par le passé pour déterminer si un tel élément structurel présentait un défaut, par exemple de nature mécanique ou chimique, ou autre. Un tel exemple d'application est décrit dans « Electromagnetic health monitoring system for
35 composite materials », Lemistre et Balageas, dans Matériaux

et Techniques, numéro hors-série 2002, Ed. SIRPE, Paris, pg 29-32.

Dans cet article, le champ électromagnétique est, pour des structures comprenant des fibres de carbone, un
5 champ magnétique localement équivalent au champ magnétique émis par un dipôle s'étendant le long d'une direction donnée de l'élément structurel et est émis par deux pistes conductrices linéaires s'étendant dans cette direction et parcourues en sens inverse par un courant électrique. Le
10 champ électrique est mesuré orthogonalement à cette direction dans le plan de la structure. L'information ainsi récoltée est utile pour déterminer si la structure présente ou non un défaut.

Pour des structures comprenant des fibres de verre
15 ou simplement une résine, le champ exciteur est un champ électromagnétique émis par les pistes s'étendant également dans cette direction.

Un tel dispositif permet de qualifier la présence ou non d'un défaut structurel dans la structure étudiée,
20 mais ne permet pas de déterminer la gravité du défaut. En présence d'un défaut, l'utilisateur du dispositif ne saura quelle conduite tenir : Attendre ou remplacer la structure (ce qui garantit la sécurité au détriment du coût) même si le défaut n'est peut-être en soi pas pénalisant pour la
25 structure dans son application quotidienne.

RESUME

Ainsi, selon l'invention, un dispositif du genre en question est essentiellement caractérisé en ce que ledit dispositif comprend en outre des moyens de calcul adaptés
30 pour obtenir une valeur de la permittivité diélectrique ϵ_r en ladite zone à partir de ladite première composante mesurée.

Grâce à ces dispositions, on obtient une information concernant l'élément structurel qui permet de
35 quantifier la gravité du défaut présenté par l'élément

structurel, car on détermine une caractéristique intrinsèque du matériau.

En pratique, cela permet de prévoir le type d'intervention à mener sur l'élément structurel, pour
5 éliminer le défaut, plutôt que d'avoir à remplacer l'élément structurel entier par ignorance.

Dans des modes de réalisation préférés de l'invention, on peut éventuellement avoir recours en outre à l'une et/ou à l'autre des dispositions suivantes :

10 - ledit élément structurel est un élément structurel inhomogène comprenant en outre un matériau imparfaitement conducteur, de conductivité électrique σ ,

les moyens d'émission sont des moyens d'émission de rayonnement magnétique adaptés pour générer un champ
15 magnétique, ledit champ magnétique étant, au niveau de la zone, équivalent à un champ magnétique émis par un dipôle magnétique s'étendant dans ladite direction,

et les moyens de calcul sont alternativement ou en outre adaptés pour obtenir une valeur de la conductivité
20 électrique σ en ladite zone à partir de ladite première composante mesurée ;

- lesdits moyens de détection sont adaptés pour mesurer en outre une deuxième composante mesurée dudit champ électrique, le long d'une deuxième direction de
25 détection formant avec ladite première direction de détection un angle non nul,

et les moyens de calcul sont adaptés pour obtenir une valeur de la conductivité électrique σ et de la permittivité électrique ϵ_r en ladite zone à partir de
30 ladite première et ladite deuxième composantes mesurées ;

- une direction choisie parmi la première et la deuxième direction de détection est ladite direction de moyens d'émission ;

- lesdits moyens d'émission comprennent une
35 couche comprenant, au niveau de ladite zone, au moins deux

pistes conductrices parallèles, orientées le long de ladite direction de dipôle et adaptées pour pouvoir être parcourues en sens inverse l'une de l'autre par un courant électrique ;

5 - lesdits moyens de détection comprennent une couche comprenant, au niveau de ladite zone, au moins une piste conductrice orientée le long de ladite première direction de détection, et une couche comprenant, au niveau de ladite zone, au moins une piste conductrice orientée le
10 long de la dite deuxième direction de détection ;

- les moyens de calcul comprennent :

. (Z) des moyens de mémoire adaptés pour contenir un modèle de la zone par au moins deux paramètres numériques liés à σ^s représentant ladite conductivité
15 électrique σ en cette zone, et ϵ_r^s représentant ladite permittivité diélectrique en cette zone, et un modèle desdits moyens d'émission,

. (E) des moyens d'estimation adaptés pour estimer une composante simulée d'un champ électrique simulé
20 généré dans ledit modèle de la zone par ledit modèle de moyens d'émission, le long de ladite première direction de détection, et

. (F) des moyens de comparaison adaptés pour comparer ladite composante simulée et ladite composante
25 mesurée correspondante obtenue par les moyens de détection (B) ;

- les moyens de calcul comprennent :

. (Z) des moyens de mémoire adaptés pour contenir un modèle de la zone par au moins deux paramètres numériques liés à σ^s représentant ladite conductivité
30 électrique σ en cette zone, et ϵ_r^s représentant ladite permittivité diélectrique en cette zone, et un modèle desdits moyens d'émission,

. (E) des moyens d'estimation adaptés pour
35 estimer une première et une deuxième composante simulée

dudit champ électrique simulé le long desdites première et deuxième directions de détection, et

(F) des moyens de comparaison adaptés pour comparer lesdites composantes simulées et lesdites composantes mesurées correspondantes obtenues par les moyens de détection (B) ;

- le dispositif comprend en outre (D) des moyens de génération adaptés pour générer ledit modèle contenu dans les moyens de mémoire (Z) ;

10 - le dispositif comprend en outre

(G) une base de données contenant des données relatives à une énergie absorbée par un élément structural présentant une conductivité électrique σ et une permittivité diélectrique ϵ_r pour lesdits matériaux ;

15 - le dispositif comprend en outre une couche de contrôle intégré des structures à technologie piézo-électrique ;

- ledit élément structural ne comprend pas de matériau imparfaitement conducteur,

20 et les moyens d'émission sont des moyens d'émission de rayonnement électrique adaptés pour générer un champ électrique s'étendant dans ladite direction.

Selon un autre aspect, l'invention concerne une structure adaptée pour un contrôle de l'état de santé d'une zone d'un élément structural de ladite structure, et comprenant :

ledit élément structural comprenant au moins un matériau diélectrique de permittivité diélectrique ϵ_r ,

30 une couche d'émission de rayonnement électromagnétique s'étendant dans une direction, ledit champ électromagnétique générant un champ électrique dans la zone,

une couche de détection adaptée pour mesurer une première composante mesurée d'un champ électrique, le long d'une première direction de détection, et

au moins un organe de connexion à des moyens de calcul adaptés pour obtenir une valeur de la permittivité diélectrique ϵ_r en ladite zone à partir de ladite première composante mesurée.

5 Selon des modes de réalisation, on peut également avoir recours à l'une et/ou à l'autre des dispositions suivantes :

- ledit élément structurel est un élément structurel inhomogène comprenant en outre un matériau
10 imparfaitement conducteur, de conductivité électrique σ ,

dans lequel les moyens d'émission sont des moyens d'émission de rayonnement magnétique adaptés pour générer un champ magnétique, ledit champ magnétique étant, au niveau de la zone, équivalent à un champ magnétique émis
15 par un dipôle magnétique s'étendant dans ladite direction,

et dans lequel les moyens de calcul sont alternativement ou en outre adaptés pour obtenir une valeur de la conductivité électrique σ en ladite zone à partir de ladite première composante mesurée ;

20 - ledit élément structurel se présente sous la forme d'au moins une couche, ladite couche de détection étant comprise entre ladite couche d'élément structurel et ladite couche d'émission ;

- ledit élément structurel se présente sous la
25 forme d'au moins une couche, ladite couche d'émission étant comprise entre ladite couche d'élément structurel et ladite couche de détection ;

- ledit élément structurel se présente sous la forme d'au moins une couche, ladite couche d'élément structurel étant comprise entre ladite couche d'émission et
30 ladite couche de détection ;

- ledit élément structurel inhomogène se présente sous la forme d'au moins une couche fine comprenant au moins un matériau imparfaitement conducteur sous la forme
35 d'au moins une fibre de carbone, de conductivité électrique

σ , et un matériau diélectrique sous la forme d'une matrice, dans laquelle sont noyées lesdites fibres de carbone, de permittivité diélectrique ϵ_r .

Selon un autre aspect, l'invention concerne un
 5 procédé de contrôle de l'état de santé d'une zone d'un élément structurel comprenant au moins un matériau diélectrique de permittivité diélectrique ϵ_r , comprenant les étapes au cours desquelles :

(a) on génère un champ électromagnétique, par des
 10 moyens d'émission de rayonnement électromagnétique s'étendant dans une direction, ledit champ électromagnétique générant un champ électrique dans la zone, et

(b) on mesure une première composante mesurée d'un
 15 champ électrique, le long d'une première direction de détection,

caractérisé en ce que le procédé comprend en outre une étape (c) au cours de laquelle on obtient une valeur de la permittivité diélectrique ϵ_r en ladite zone à partir de
 20 ladite première composante mesurée.

Selon des modes de réalisation préférés, on peut en outre avoir recours à l'une et /ou à l'autre des dispositions suivantes :

- ledit élément structurel est un élément
 25 structurel inhomogène comprenant en outre un matériau imparfaitement conducteur, de conductivité électrique σ ,

au cours de l'étape (a), on génère un champ magnétique par des moyens d'émission de rayonnement magnétique, ledit champ magnétique étant, au niveau de la
 30 zone, équivalent à un champ magnétique émis par un dipôle magnétique s'étendant dans ladite direction,

et au cours de l'étape (c), on obtient alternativement ou en outre une valeur de la conductivité électrique σ en ladite zone à partir de ladite première
 35 composante mesurée ;

- au cours d'une première itération, on effectue les étapes (a) à (c) pour une première fréquence des moyens d'émission,

au cours d'une deuxième itération, on répète les
5 étapes (a), (b), et (c) pour une deuxième fréquence, et

au cours de l'étape (c) de la deuxième itération, on prend en compte la valeur obtenue au cours de l'étape (c) d'une itération précédente ;

- au cours de chaque étape (b), on mesure en
10 outre une deuxième composante mesurée dudit champ électrique, le long d'une deuxième direction de détection formant avec ladite première direction un angle non nul,

et, au cours de l'étape (c) de chaque itération, on prend en compte lesdites première et deuxième composantes
15 mesurées ;

- au cours de l'étape (c), pour chaque itération, disposant, dans des moyens de mémoire, d'un modèle initial de la zone par au moins deux paramètres numériques liés à σ^s représentant ladite conductivité électrique σ en
20 cette zone, et ϵ_r^s représentant ladite permittivité diélectrique en cette zone, et un modèle desdits moyens d'émission,

(e) on estime au moins une première composante simulée d'un champ électrique simulé généré dans ledit
25 modèle de la zone par ledit modèle de moyens d'émission, le long d'une direction de détection choisie parmi lesdites première et deuxième direction de détection, et

(f) on compare ladite composante simulée et ladite composante mesurée correspondante obtenue au cours de
30 l'étape (b) ;

- le procédé comprend en outre, antérieurement à l'étape (e) une étape (d) dans laquelle on génère, dans les moyens de mémoire, un modèle initial de la zone par au moins deux paramètres numériques liés à σ^s représentant
35 ladite conductivité électrique σ en cette zone, et ϵ_r^s

représentant ladite permittivité diélectrique en cette zone, et un modèle desdits moyens d'émission ;

- au cours de l'étape (b), on mesure une deuxième composante mesurée dudit champ électrique, le long de
5 l'autre direction de détection,

au cours de l'étape (e), on estime une deuxième composante simulée correspondante dudit champ électrique simulé,

et au cours de l'étape (f), on compare ladite
10 deuxième composante simulée et ladite deuxième composante mesurée obtenue au cours de l'étape (b) ;

- postérieurement à l'étape (f), on met en outre en œuvre l'étape (d') dans laquelle on génère un modèle modifié de la zone par au moins deux paramètres numériques
15 liés à σ^s représentant ladite conductivité électrique σ en cette zone, et ϵ_r^s représentant ladite permittivité diélectrique en cette zone, différent du modèle initial par au moins l'un des paramètres numériques, et on met en œuvre les étapes (e) et (f) pour ledit modèle modifié ;

- l'étape (c) comprend en outre une étape (g) au
20 cours de laquelle on détermine au moins une caractéristique de la zone choisie parmi la conductivité σ et la permittivité ϵ_r en identifiant ladite conductivité simulée σ^s à ladite conductivité et/ou ladite permittivité simulée
25 ϵ_r^s à ladite permittivité, dès lors que la comparaison effectuée à l'étape (f) donne un résultat satisfaisant.

- le procédé comprend en outre une étape au cours de laquelle

(h) on détermine une énergie absorbée par ledit
30 élément structurel présentant ladite conductivité électrique σ et/ou ladite permittivité diélectrique ϵ_r obtenues à l'étape (c) par inférence sur une base de données contenant des données concernant une énergie absorbée par un élément structurel présentant une
35 conductivité électrique σ et une permittivité diélectrique

ϵ_r pour lesdits matériaux ;

- ledit élément structurel ne comprend pas de matériau électriquement conducteur, même imparfaitement, et au cours de l'étape (a), on génère dans la zone, à l'aide
5 de moyens d'émission de rayonnement électrique, un champ électrique dans ladite direction ;

- au cours de l'étape (c),
disposant, dans des moyens de mémoire, d'un modèle initial de la zone par au moins un paramètre numérique lié
10 à ϵ_r^s représentant ladite permittivité diélectrique en cette zone, et un modèle desdits moyens d'émission,

(d) on estime une composante simulée d'un champ électrique simulé induit dans ledit modèle de la zone par ledit modèle de moyens d'émission, et

15 (e) on compare ladite composante simulée et ladite composante mesurée correspondante obtenue au cours de l'étape (b).

DESCRIPTION DES FIGURES

D'autres caractéristiques et avantages de
20 l'invention apparaîtront au cours de la description suivante d'une de ses formes de réalisation, donnée à titre d'exemple non limitatif, en regard des dessins joints.

Sur les dessins :

- la figure 1 est une vue en perspective d'une
25 structure instrumentée,

- la figure 2 est une vue en perspective de la face interne d'une zone de la structure présentée sur la figure 1 munie d'un dispositif selon l'invention,

- la figure 3 est une vue en perspective éclatée
30 d'une structure composite à laquelle l'invention est applicable,

- la figure 4 est une vue schématique plane d'une source de rayonnement magnétique utilisée dans le cadre de l'invention,

35 - les figures 5a, 5b, 5c sont des vues

schématiques planes de différents modes de réalisation ou de moyens de détection selon l'invention,

- les figures 6a, 6b, 6c sont des vues schématiques du modèle utilisé dans le cadre de l'invention,

- la figure 7 est une vue schématique de côté représentant le calcul du champ électrique dans un milieu, dans le cadre de l'invention,

- la figure 8 est une figure schématique représentant le calcul des sources effectives dans une structure,

- la figure 9 est une vue schématique de côté représentant le calcul du champ électrique dans un milieu 1 dans le cadre de l'invention,

- les figures 10a et 10b représentent une alternative au calcul de champ électrique au niveau de la face interne 1b de la structure,

- la figure 11 est une vue schématique plane d'un modèle d'un endommagement de la structure étudiée,

- la figure 12 est un diagramme représentatif du calcul de σ et/ou ϵ_r pour la structure sous test,

- la figure 13 est une vue schématique de côté représentative du calcul correspondant à une structure multicouches, et

- la figure 14 est une vue en perspective représentant un autre type de structure, genre sandwich, susceptible d'être muni d'un dispositif selon un deuxième mode de réalisation de l'invention.

Sur les différentes figures, les mêmes références désignent des éléments identiques ou similaires.

DESCRIPTION DES MODES DE REALISATION

La figure 1 représente un élément structurel 1 qui est typiquement une partie d'une structure réalisée en un matériau composite du type comprenant une résine renforcée par des fibres de carbone. L'élément structurel en question

est, par exemple, un élément rigide de la structure d'un véhicule spatial, naval, automobile, ferroviaire ou autre, dans lequel les matériaux composites trouvent des applications importantes, en particulier grâce au gain en poids qu'ils permettent à la structure de présenter par rapport à une structure métallique présentant une rigidité équivalente. Ainsi, l'élément structurel 1 en question peut être une entité en cours de fabrication, ou autre, destinée à être montée dans une structure complète, ou peut éventuellement être une partie d'une structure complète en service.

L'élément structurel 1 comporte un dispositif intégré de contrôle de structure 2 (voir figures suivantes) qui est, par exemple, disposé sur sa face interne 1b, la face externe 1a de l'élément structurel étant tournée vers l'espace extérieur, et de ce fait, susceptible d'être endommagée lors de l'utilisation du véhicule comprenant l'élément structurel. Le dispositif de contrôle 2 est ainsi utilisé pour évaluer l'ampleur de l'endommagement subi par l'élément structurel 1 au niveau de sa face externe 1a. Un tel endommagement peut être causé soit dans l'utilisation normale du véhicule comprenant l'élément structurel, soit volontairement en cours de fabrication, lors de tests destinés à étudier la résistance de l'élément structurel destiné à faire partie de la structure, soit pour vérifier les propriétés des matériaux utilisés dans le cadre de la fabrication de l'élément structurel.

Ces endommagements sont typiquement de trois types distincts, à savoir : un endommagement d'origine mécanique, suite par exemple à un choc, ou un endommagement d'origine thermique, suite à une élévation de température importante subie par le composant, ou de nature chimique, suite par exemple à une absorption de liquide.

Le dispositif de contrôle intégré 2 présente des organes de connexion adaptés pour le relier à une unité de

commande 3 utilisée pour émettre des signaux d'excitation vers le dispositif de contrôle, et recevoir des signaux de ce dispositif de contrôle, ces signaux étant fonction du possible endommagement de l'élément structurel.

5 On se réfère maintenant à la figure 2 qui représente de manière schématique une zone de l'élément structurel 1 munie sur sa face interne 1b du dispositif de contrôle intégré de structure 2, selon un mode de réalisation de celui-ci. Le dispositif en tant que tel se
10 présente sous la forme de pistes conductrices maintenues dans un mylar fixées par exemple par collage à la face interne 1b de l'élément structurel. Le dispositif 2 comprend en particulier une couche d'émission 4 (détaillée plus loin) comprenant une pluralité de pistes conductrices
15 linéaires parallèles 9 s'étendant le long d'un axe X de l'élément structurel, et reliées entre elles, par exemple en une extrémité, par une piste conductrice 10, par exemple perpendiculaire. Le dispositif de contrôle intégré des structures présente également des moyens de détection sous
20 la forme d'une couche de détection 5, comprenant également des pistes conductrices 12, et pouvant se présenter selon une pluralité de variantes comme décrit en relation aux figures 5a, 5b et 5c. La couche d'émission 4 peut être comprise entre l'élément structurel 1 et la couche de
25 détection 5 ou, de manière indifférente, c'est la couche de détection 5 qui est comprise entre la couche d'émission 4 et l'élément structurel 1. Les pistes de la couche d'émission 4 et de la couche de détection 5 sont reliées à l'unité centrale 3.

30 La figure 2 représente une portion suffisamment petite de l'élément structurel de la figure 1 pour pouvoir localement être considérée comme plane dans le plan (X ; Y). La flexibilité des couches d'émission 4 et de détection 5 permet à celles-ci d'être fixées, par exemple par collage
35 sur la face interne de l'élément structurel 1 entier, même

si celui-ci présente une courbure non nulle, comme représenté sur la figure 1.

La figure 3 représente par exemple l'élément structurel 1 sous la forme d'un élément composite constitué d'une matrice 6, un matériau diélectrique caractérisable par sa permittivité diélectrique ϵ_r , et de fibres de carbone 7, ou de tout autre matériau imparfaitement électriquement conducteur adapté, caractérisable par sa conductivité électrique σ . De manière classique, l'élément structurel 1 composite comporte plusieurs couches 8a, 8b, 8c, 8d dans lesquelles les fibres de carbone s'étendent dans des directions différentes pour donner à la structure un caractère orthotrope. Les couches 8a et 8d présentent ainsi des fibres de carbone s'étendant dans la direction X, tandis que les couches 8b et 8c présentent des fibres de carbone s'étendant dans la direction Y.

On peut également utiliser l'invention pour des structures quasi-isotropes dans lesquelles les fibres de carbone de couches successives forment entre elles un angle de 45° , ou tout matériau composite approprié à base de matériau imparfaitement conducteur.

La figure 4 représente schématiquement la couche d'émission 4 fixée sur l'élément structurel 1 et comprenant des pistes conductrices électriquement linéaires 9 parallèles s'étendant dans la direction X reliées entre elles par exemple en une extrémité par une piste électriquement conductrice 10 présentant éventuellement une série d'interrupteurs 11, et reliées en leur autre extrémité à l'unité de commande 3. L'unité de commande 3 peut émettre un courant i dans une piste conductrice 9a, l'interrupteur 11 associé à cette piste conductrice 9a étant fermé, et les autres interrupteurs 11 étant ouverts, de sorte que le courant circule également dans la piste conductrice 9b voisine dans le sens opposé du courant circulant dans la piste conductrice 9a, de manière à former

une boucle générant dans la structure un champ magnétique B équivalent au champ magnétique généré par un dipôle magnétique orienté le long de la direction X.

Le courant i émis par l'unité centrale 3 est de
5 préférence un courant alternatif généré successivement à
plusieurs fréquences comme décrit plus en détail par la
suite. Le courant en question est émis successivement dans
les différentes pistes 9 de la couche d'émission 4, et les
interrupteurs correspondants peuvent être ouverts ou fermés
10 de manière adaptée pour pouvoir scanner la structure 1 le
long de la direction Y. On pourra utiliser tout autre moyen
adapté pour scanner la structure. Toutes ces opérations
sont commandées par l'unité centrale 3.

De manière classique, en contrôle intégré des
15 structures hybrides, le champ magnétique B émis par la
couche d'émission 4 génère dans l'élément structurel 1
imparfaitement conducteur des courants de Foucault qui
forment un champ électrique E détecté par la couche de
détection 5.

20 La figure 5a représente, par exemple, de manière
également schématique, un premier mode de réalisation d'une
telle couche de détection 5 selon l'invention. Dans ce
premier mode de réalisation, il est plus judicieux de
parler de deux couches de détection 5a, 5b, destinées à
25 être placées l'une sur l'autre, la couche 5b comportant une
série de pistes conductrices parallèles linéaires 12
reliées en une extrémité à l'unité centrale 3, et libres en
l'autre extrémité, et disposées le long de l'axe Y de
manière perpendiculaire aux pistes conductrices 9 de la
30 couche d'émission 4. Une couche de détection 5b de ce genre
a déjà été décrite à plusieurs reprises, et en particulier
dans l'article susmentionné, et est adaptée pour détecter
la composante E_y s'étendant le long de la direction Y du
champ électrique E. La couche 5a se compose de manière
35 similaire et présente des pistes conductrices 12 également

reliées à l'unité de commande 3, mais orientées le long de la direction X afin de détecter la composante E_x du champ électrique E. Notons également ici que les composantes E_x et E_y détectées sont définies par l'orientation du dipôle magnétique équivalent au niveau de la couche d'émission en la zone étudiée, et que l'orientation des fibres de carbone dans le matériau est à ce titre indifférente.

L'information mesurée en excitant les fibres conductrices 9a et 9b de la couche d'émission 4 et les pistes conductrices 12a et 12b de la couche de détection 5 permettent d'obtenir une information relative à E_x et/ou E_y au niveau de l'"intersection" de ces pistes. En excitant successivement les différentes pistes conductrices 9a, 9b, puis pour chacune, en excitant successivement les différentes pistes conductrices 12a et 12b, on obtient ainsi, en une fraction de seconde, une cartographie complète de l'élément structurel 1 portant le dispositif de contrôle intégré des structures 2, même de grande taille.

Pour chaque point scanné, le courant émis est un courant alternatif émis successivement à différentes fréquences, ce qui permet de scanner également la structure 1 en profondeur. En scannant la structure à une fréquence élevée, correspondant à l'épaisseur de la couche superficielle de l'élément structurel, on obtient des informations spécifiques à cette couche. En abaissant la fréquence à une fréquence correspondant à l'épaisseur des deux premières couches, on obtient des informations relatives à ces deux couches. En utilisant les informations obtenues pour la première couche, on obtient des informations sur la deuxième couche seule. En continuant ainsi, on scanne en profondeur l'élément structurel.

En pratique, l'endommagement subi par la structure aura été subi sur sa face externe 1a, et le dispositif de contrôle d'intégré 2 sera disposé sur sa face interne 1b, en particulier de manière à prévenir tout risque

d'endommagement du dispositif de contrôle intégré, et il est donc essentiel que celui-ci soit capable de déterminer un endommagement survenu "en profondeur" par rapport à lui. Aussi peut on effectuer les calculs itératifs couche à
 5 couche en commençant à une basse fréquence pour obtenir une information sur la structure entière, puis en élevant successivement la fréquence.

Les inventeurs ont remarqué que la détection de la composante E_y du champ électrique parcourant l'élément
 10 structurel 1 permettait d'obtenir une information supplémentaire par rapport à la simple détection de la composante E_x du champ électrique. A l'aide des deux composantes indépendantes E_x et E_y , il est possible de retrouver par calcul une valeur des deux caractéristiques
 15 du matériau, à savoir la conductivité électrique σ du milieu et la permittivité diélectrique ϵ_r de la matrice.

Les composantes mesurées peuvent être réelles ou complexes de la forme $E_x = E_x^0 e^{j(\omega t + \phi)}$, portant alors l'information de l'amplitude et de la phase.

20 Le calcul séparé de la conductivité électrique σ et de la permittivité diélectrique ϵ_r est intéressant, car il permet à son tour de caractériser le type de défaut que la structure a pu subir, entre d'une part les défauts d'origine mécanique qui entraînent un délaminage entre
 25 couches et éventuellement une rupture des fibres de carbone et ainsi uniquement une variation de la conductivité électrique σ , ou d'autre part, les défauts d'origine chimique ou thermique qui entraînent un endommagement principalement de la matrice et donc une modification de la
 30 permittivité diélectrique ϵ_r de celle-ci, et éventuellement de la conductivité σ du milieu par pyrolyse de la résine. L'intérêt de pouvoir caractériser la nature de l'endommagement qu'a subi la structure est de pouvoir prévoir par exemple le type d'intervention (réparation) à

conduire sur la structure.

Les inventeurs ont, en outre, montré que cette méthode permettait de détecter des défauts d'origine chimique et/ou thermique avec une précision supérieure aux techniques existantes de contrôle intégré des structures, qui sont plutôt adaptées pour la mesure des défauts d'origine mécanique.

Bien entendu, il existe de nombreux autres moyens, dans le cadre de l'invention, pour détecter la composante E_y du champ électrique parcourant la structure. En particulier, deux modes de réalisation alternatifs de la couche de détection sont présentés en référence aux figures 5b et 5c respectivement.

Sur la figure 5b, la couche de détection 5 n'est plus formée que par une seule couche qui comporte une série de pistes conductrices 12 en zig zag, les pistes 12a et 12b restant parallèles tout en formant ces zig zag. De manière purement illustrative, on a représenté également sur la figure 5b les pistes conductrices 9a et 9b de la couche d'émission 4 superposées à la couche de détection 5 et excitées par l'unité centrale 3, parcourues par le courant i . L'unité centrale 3 peut alors lire au niveau des pistes conductrices 12a et 12b une information relative à $E_x + E_y$ si les zig zag sont orientés de 45° par rapport aux direction X et Y. Ce mode de réalisation est le mode de réalisation illustré sur la figure 2 représentant globalement la structure et également la couche d'émission 4.

Selon un troisième mode de réalisation représenté sur la figure 5c, on reprend pour la couche de détection 5 le mode de réalisation de la figure 5b et on lui adjoint une série de pistes conductrices parallèles deux à deux 12c, 12d, superposées respectivement à la piste conductrice 12a et à la piste conductrice 12b selon un zig zag inverse, de sorte que alors que les pistes conductrices 12a et 12b

permettent d'obtenir une information relative à $E_x + E_y$, les pistes conductrices parallèles 12c et 12d permettent d'obtenir pour les mêmes pistes conductrices 9a, 9b excitées de la couche d'émission 4 une information relative à la composante $E_x - E_y$ du champ électrique. En combinant ces deux informations, on retrouvera directement les composantes E_x et E_y séparément.

Il n'est bien sûr pas obligatoire que les zig zag formés par les pistes conductrices 12a, 12b, 12c, 12d, dans aucun des modes de réalisation présentés forment un angle de 45° avec les directions X et Y telles que définies par l'orientation des pistes conductrices 9 de la couche d'émission 4, et on peut choisir n'importe quel angle. En outre, bien que les zig zag des pistes conductrices 12a à 12d soient représentés à angles droits, il n'est pas interdit que les pistes conductrices en question présentent des angles arrondis pour des raisons de réalisation pratique.

Le signal détecté au niveau des pistes conductrices 12 de la couche de détection par l'unité centrale 3 est éventuellement traité par des algorithmes bien connus du traitement du signal tels qu'il en a déjà été utilisé dans le domaine du contrôle intégré des structures, tel par exemple l'algorithme de Donoho cité dans l'article susmentionné. Un tel traitement du signal peut, en effet, être utile pour s'affranchir des différents termes de bruits que porte le signal.

Le dispositif tel que décrit permet d'obtenir des résultats qualitatifs sur l'état de santé des structures, par exemple en comparant les résultats obtenus avec des résultats obtenus précédemment pour la structure en question, par exemple lors de la mise en service de la structure, ou lors d'un examen antérieur si la structure est scannée périodiquement. La comparaison des résultats de détection avec des résultats de détection précédents permet

de déterminer l'occurrence et la nature d'un éventuel endommagement subi par la structure.

Il est, de plus, possible de quantifier le niveau d'endommagement, comme décrit par la suite à l'aide d'un
 5 modèle adapté pour calculer le champ électrique pour la structure étudiée, au niveau de la couche de détection.

On dispose pour ce faire, dans l'unité centrale 3, d'un modèle de la structure, qui peut par exemple avoir été préétabli au moment de la mise en service de la structure.
 10 Ce modèle est en particulier adapté pour qu'on puisse lui appliquer la méthode DPSM (acronyme anglais de l'expression Distributed Point Source Method) qui sera détaillée de manière générale à l'aide des figures 6a, 6b et 6c. Cette méthode est particulièrement adaptée en ce qu'elle permet
 15 d'obtenir en des temps de calcul courts une information relative à un point (ou une partie limitée) de l'espace. Ceci dit, rien ne s'oppose à ce que le dispositif précédemment décrit soit utilisé avec une méthode de calcul classique du genre « éléments finis ».

20 On se réfère tout d'abord à la figure 6a, sur laquelle une première surface b est maillée selon une pluralité d'échantillons de surface tels que $dS'1$, $dS'2$, $dS'3$ et $dS'4$. De même une deuxième surface a est maillée par une pluralité d'échantillons de surface tels que $dS1$,
 25 $dS2$, $dS3$, $dS4$, ...

En se référant à la figure 6b, à chaque échantillon de surface dS_i est associé un hémisphère HEM_i tangent à l'échantillon de surface dS_i en un point de contact P_i . Préférentiellement, ce point de contact P_i correspond au
 30 sommet de l'hémisphère HEM_i .

Pendant cette étape de maillage des surfaces b et a, on évalue, d'une part, la surface de l'élément structural et, d'autre part, on choisit un nombre d'échantillons de surface dS_i selon la position souhaitée
 35 de l'estimation du champ électrique. Ainsi, la surface d'un

échantillon dS_i est donnée par S_0/N où S_0 correspond à la surface totale de la surface b à étudier, et N correspond au nombre choisi d'échantillons de surface dS_i .

L'hémisphère HEM_i est de même surface que
 5 l'échantillon dS_i . Ainsi, le rayon R_i de l'hémisphère se déduit de l'expression $2\pi R_i^2 = S_0 / N$.

Chaque maille que représente un échantillon de surface dS_i présente, dans l'exemple décrit, une forme de parallélogramme, de centre P_i correspondant au point
 10 d'intersection des diagonales de ce parallélogramme.

L'hémisphère HEM_i est tangent à l'échantillon de surface dS_i en ce point P_i . Bien entendu, les mailles peuvent être de formes différentes, triangulaires ou autres. On indique de façon générale que le point P_i
 15 correspond au barycentre de la maille.

Il pourra être utile de repartir directement d'un maillage de l'élément structurel développé lors de la conception de la structure.

Lorsque les conditions aux limites du problème
 20 portent sur une grandeur vectorielle, on affecte trois sources SA_i , SB_i , SC_i à l'échantillon de surface dS_i .

Les trois sources SA_i , SB_i , SC_i , attribuées à un échantillon de surface dS_i ont des positions respectives déterminées comme indiqué ci-après. Telles que représentées
 25 sur la figure 6b, les trois sources SA_i , SB_i , SC_i sont coplanaires et le plan comportant ces trois sources comporte en outre la base de l'hémisphère HEM_i . L'hémisphère HEM_i est construit avec le centre du disque constituant la base de l'hémisphère qui correspond au
 30 barycentre des trois sources SA_i , SB_i , SC_i .

Pour un hémisphère HEM_2 voisin, les trois sources SA_2 , SB_2 , SC_2 peuvent être orientées de manière différente des sources SA_1 , SB_1 , SC_1 de l'hémisphère HEM_1 , comme représenté sur la figure 6c, et en règle générale, les
 35 sources des différents hémisphères peuvent être orientées

de manière aléatoire pour éviter un phénomène de surpériodicité.

On considère que les sources $S'_{A1}, \dots, S'_{CN}, S_{A1}, \dots, S_{CN}$ sont des charges fictives émettant une grandeur
5 d'excitation dans la structure.

On relie le champ électrique en des points M_1, \dots, M_N quelconques du milieu aux intensités des charges des sources des points $A_1, \dots, A_N, B_1, \dots, B_N, C_1, \dots, C_N$ par l'expression suivante:

$$\begin{pmatrix} V_x(M_1) \\ V_x(M_2) \\ \vdots \\ V_x(M_N) \\ V_y(M_1) \\ V_y(M_2) \\ \vdots \\ V_y(M_N) \\ V_z(M_1) \\ V_z(M_2) \\ \vdots \\ V_z(M_N) \end{pmatrix} = F'(M) \cdot \begin{pmatrix} v'A_1 \\ v'A_2 \\ \vdots \\ v'A_N \\ v'B_1 \\ v'B_2 \\ \vdots \\ v'B_N \\ v'C_1 \\ v'C_2 \\ \vdots \\ v'C_N \end{pmatrix} \quad [1]$$

10

où :

- le coefficient $v'_{\Sigma j}$ ($\Sigma = A, B, C$ et $j = 1, 2, \dots, N$) de la première matrice colonne correspond à la valeur de charge électrique q_j pour la source $S'_{\Sigma j}$;
- 15 - les coefficients $V_u(M_i)$ (avec $u = X, Y, Z$ et $i = 1, 2, \dots, N$) de la seconde matrice colonne correspondent à une valeur du champ électrique en un point M_i de l'espace ;
- la matrice d'interaction F' , de dimension $3N \times 3N$
20 s'exprime par la relation :

$$F' = \begin{pmatrix} \overbrace{N\{C_A^x(i,j)\}}^N & \overbrace{C_B^x(i,j)}^N & \overbrace{C_C^x(i,j)}^N \\ N\{C_A^y(i,j)\} & C_B^y(i,j) & C_C^y(i,j) \\ N\{C_A^z(i,j)\} & C_B^z(i,j) & C_C^z(i,j) \end{pmatrix} \quad [2]$$

L'expression de ces coefficients est la suivante :

$$C_{\Sigma}^u(i,j) = f_u [d(P_i, S_{\Sigma,j})] \quad [3]$$

avec

$\Sigma = A, B, C$

5

$i = 1, 2, \dots, N$

$j = 1, 2, \dots, N$

$u = x, y, z.$

$$C_{\Sigma}^u(i,j) = \left[-\overline{\text{grad}} \frac{1}{2\pi\epsilon M_i S_{\Sigma,j}} \right]_u, \quad [4]$$

où $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$ correspond à la permittivité
10 diélectrique du milieu où se situe le point M_i .

Ainsi, le système matriciel de l'équation 1 permet
d'estimer, à partir d'une matrice d'interaction F' et d'un
vecteur comportant les valeurs $v'_{\Sigma j}$ associées aux sources
 $S'_{\Sigma j}$, les coefficients d'un vecteur (matrice colonne)
15 comportant les valeurs du champ électrique $V(M_i)$ au point
de l'espace M_i .

Pour déterminer les valeurs des sources $v'_{\Sigma j}$, on
applique le système matriciel de l'équation 1 aux points
 P'_1, \dots, P'_N correspondant au sommet des hémisphères HEM_i de la
20 surface b , où on peut connaître le champ électrique
incident. Les valeurs des sources $v'_{\Sigma 1}, v'_{\Sigma 2}, \dots, v'_{\Sigma N}$ sont
ainsi déterminées par l'équation suivante :

$$\begin{pmatrix} v'_{A1} \\ \vdots \\ v'_{AN} \\ v'_{B1} \\ \vdots \\ v'_{BN} \\ v'_{C1} \\ \vdots \\ v'_{CN} \end{pmatrix} = F'(P')^{-1} \times \begin{pmatrix} V_x(P'_1) \\ \vdots \\ V_x(P'_N) \\ V_y(P'_1) \\ \vdots \\ V_y(P'_N) \\ V_z(P'_1) \\ \vdots \\ V_z(P'_N) \end{pmatrix} \quad [5]$$

où les coefficients de $F'^{-1}(P')$ sont déterminés car on connaît les distances respectives des points P'_1, \dots, P'_N aux points A_1, \dots, C_N .

5 Une fois que ces valeurs de sources $v'_{\Sigma j}$ sont ainsi déterminées, on calcule facilement l'expression du champ électrique V' en un point quelconque M de l'espace.

En se référant à nouveau à la figure 6a, on comprendra que la deuxième surface a recevant l'onde émise par la première surface b agit, elle-même, comme une surface active réémettant une onde secondaire par réflexion. Chaque source $S_{\Sigma i}$ représente une contribution à l'émission de cette onde secondaire.

15 Pour tenir compte à la fois de la présence de l'onde principale et de la présence de l'onde secondaire aux points M , on estime la contribution de l'onde principale et la contribution de l'onde secondaire au point M par le système matriciel :

$$V'(M) = F x \begin{pmatrix} v_{A1} \\ v_{A2} \\ \vdots \\ v_{AN} \\ v_{B1} \\ v_{B2} \\ \vdots \\ v_{BN} \\ v_{C1} \\ v_{C2} \\ \vdots \\ v_{CN} \end{pmatrix} + F' x \begin{pmatrix} v'_{A1} \\ v'_{A2} \\ \vdots \\ v'_{AN} \\ v'_{B1} \\ v'_{B2} \\ \vdots \\ v'_{BN} \\ v'_{C1} \\ v'_{C2} \\ \vdots \\ v'_{CN} \end{pmatrix} \quad [6]$$

où :

- F est la matrice d'interaction entre la surface a et les points M;

5 - $v_{\Sigma j}$ ($\Sigma = A, B, C$; $j = 1, 2, 3, \dots, N$) est la valeur des sources attribuées à chaque échantillon de surface dS_j de la surface a, N étant le nombre total de mailles choisies pour cette surface.

10 Les coefficients de matrice F sont fonction de la distance $MS_{\Sigma j}$ où $S_{\Sigma j}$ sont les sources affectées à chaque échantillon dS_j de deuxième surface a.

Dans le cas où le champ émis par la deuxième surface est la réflexion du champ émis par la première, les valeurs des sources $v_{\Sigma j}$ de la deuxième surface a sont
15 déterminées en fonction des valeurs des sources de la première surface b, comme détaillé ci-après en référence à la figure 7.

On affecte une valeur de coefficient de réflexion à chaque point P_i de la deuxième surface a.

20 Dans le cas particulier d'un matériau en fibres de carbone noyées dans une résine, ce coefficient de réflexion est en particulier fonction de la conductivité électrique modélisée σ^s des fibres de carbone en ce point et la permittivité diélectrique modélisée ϵ_r^s de la résine en ce

point. On introduit donc une matrice R_a qui est représentative du coefficient de réflexion en chaque point P_i . En chaque point,

$$R_a = \frac{1 - (\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0})}{1 + \left(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right)}, \quad [7]$$

5 où j est le nombre complexe tel que $j^2 = -1$, ω est la pulsation du champ incident, ϵ_r la permittivité diélectrique relative du matériau et ϵ_0 la permittivité diélectrique du vide.

Dans ce qui suit, on indique que :

10 - $F(P_i)$ est la matrice d'interaction de la deuxième surface a appliquée au point P_i de la deuxième surface ;

- $F(P'_i)$ est la matrice d'interaction de la deuxième surface appliquée au point P'_i de la première surface ;
15

- $F'(P_i)$ correspond à la matrice d'interaction de la première surface appliquée au point P_i de la deuxième surface ;

- $F'(P'_i)$ correspond à la matrice d'interaction de la première surface appliquée au point P'_i de la première surface ;
20

- v' correspond au vecteur colonne comportant les valeurs des sources S'_{xi} de la première surface ; et

- v correspond au vecteur colonne comportant les valeurs des sources S_{xi} de la deuxième surface.
25

Au niveau de la deuxième surface de l'élément structural 1, la contribution de l'onde incidente émise par la première surface b s'exprime par :

$$\bar{V}'(P) = F'(P) \cdot \bar{v}' \quad [8]$$

30 La contribution de l'onde secondaire renvoyée par la deuxième surface a s'exprime, par définition, par la

relation :

$$\vec{V}(P) = F(P) \cdot \vec{v} \quad [9]$$

Or, dans l'exemple représenté sur la figure 7, l'onde secondaire correspond simplement à une réflexion de
5 l'onde principale, ce qui s'exprime par la relation :

$$\vec{V}(P) = R_a \vec{V}'(P) \quad [10]$$

où R_a correspond à une matrice de réflexion dont chaque coefficient représente la contribution à l'émission, par réflexion, de l'onde secondaire, par chaque source $S_{\Sigma i}$
10 de la deuxième surface.

Des trois relations précédentes, on déduit l'expression du vecteur colonne v comportant les valeurs des sources sur la deuxième surface, à partir du vecteur
colonne v' comportant les valeurs des sources de la
15 première surface b par la relation :

$$\vec{v} = [F(P)]^{-1} \cdot R_a \cdot [F'(P)] \cdot \vec{v}' \quad [11]$$

Ainsi, la valeur du champ $V'(P')$ sur la première surface b est déterminée directement en fonction des valeurs des sources v' de la première surface b dans le cas
20 où le champ électrique initial est émis sur une unique surface de la structure étudiée.

La figure 8 présente de manière générale le cas du calcul des sources équivalentes pour une structure 1 soumise à un champ électrique simulé par des charges
25 initiales v'_0 sur la surface b et v_0 sur la surface a .

De manière générale, si un champ extérieur est également appliqué sur la deuxième surface, on superpose à l'équation 11 l'équation 6 appliquée aux sources de la deuxième surface : $V'(P') = F'(P') v'$.

30 De manière générale, le champ réfléchi sur la deuxième surface a de la structure sera à nouveau réfléchi sur la première surface b comme si émis par des sources v'_2 selon :

$$R_b V'_2(P') = F'(P') v'_2,$$

Soit $v'_2 = F'^{-1}(P') R_b V'_2(P')$,

Soit encore $v'_2 = F'^{-1}(P') R_b F'(P) v_1$ [12].

v_1 sont les sources d'un champ correspondant lui-même à une réflexion du champ émis par les sources

5 originaires v'_0 selon :

$R_a V_1(P) = F(P) v_1$,

Soit $v_1 = F^{-1}(P) R_a V_1(P)$,

Soit encore $v_1 = F^{-1}(P) R_a F(P') v'_0$ [13].

En combinant [12] et [13], on obtient la source
10 fictive v'_2 en fonction de la source initiale v'_0 selon :

$v'_2 = F'^{-1}(P') R_b F'(P) F^{-1}(P) R_a F(P') v'_0$.

On peut écrire $v'_2 = B A v'_0$, avec les matrices
 $A = F^{-1}(P) R_a F(P')$ et $B = F'^{-1}(P') R_b F'(P)$.

De même sur la surface externe a,

15 $v_2 = F^{-1}(P) R_a F(P') F'^{-1}(P') R_b F'(P) v_0$,

soit $v_2 = A B v_0$.

La source effective correspond à la somme des
différents termes provenant des différentes réflexions :

$V_{Total} = v_0 + v_1 + v_2 + \dots$,

20 $V_{Total} = v_0 + A v'_0 + AB v_0 + \dots$

En écrivant de manière similaire les sources v'_{Total}
sur l'autre surface, on peut regrouper ces deux équations
sous la forme :

$$\begin{pmatrix} v_{Total} \\ v'_{Total} \end{pmatrix} = \left[\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & A \\ B & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} AB & 0 \\ 0 & BA \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & ABA \\ BAB & 0 \end{pmatrix} + \dots \right] \begin{pmatrix} v_0 \\ v'_0 \end{pmatrix} \quad [14]$$

25 soit $\begin{pmatrix} v_{Total} \\ v'_{Total} \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} v_0 \\ v'_0 \end{pmatrix}$.

En pratique, on se limitera à un nombre fini de
réflexions, correspondant à un nombre fini de termes pour
la matrice P , puisque chaque champ réfléchi est bien
entendu atténué par rapport au champ incident. On choisira
30 dans la pratique de ne considérer aucune réflexion, soit

$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, une réflexion, soit $P = \begin{pmatrix} 1 & A \\ B & 1 \end{pmatrix}$, ou plus, selon la

nature du matériau, l'épaisseur considérée, la précision de résultat souhaitée, entre autres.

Finalement, le champ électrique V est calculé aux points choisis en fonction des sources initiales $\begin{pmatrix} v_0 \\ v'_0 \end{pmatrix}$ par

5 la formule :

$$\begin{pmatrix} V \\ V' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F'(P') & F(P') \\ F'(P) & F(P) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{Total} \\ v'_{Total} \end{pmatrix} = M_0 P \begin{pmatrix} v_0 \\ v'_0 \end{pmatrix}, \quad [15],$$

$$\text{où } \begin{pmatrix} F'(P') & F(P') \\ F'(P) & F(P) \end{pmatrix} = M_0.$$

Ainsi, le potentiel en tout point de l'espace compris entre les surfaces a et b peut être calculé en
10 fonction de la valeur des sources initiales v_0 et v'_0 .

La technique DPSM qui vient d'être décrite peut être utilisée de trois manières différentes.

I/ La figure 9 représente l'application des concepts précédents au cas où la première surface b est la
15 couche d'émission 4, la deuxième surface a est la face interne 1b de l'élément structurel 1, le milieu étant l'air ou une résine dans laquelle les spires de la couche de détection 5 sont maintenues. On cherche à calculer le champ électrique au point M de la couche de détection 5.

20 Comme on connaît l'expression du courant i parcourant la couche d'émission 4, on peut calculer analytiquement, par exemple par la loi de Biot et Savart, le champ électrique incident sur la face interne 1b de l'élément structurel. On applique le coefficient de
25 réflexion au champ incident pour déterminer le champ réfléchi. On calcule alors la valeur de sources s_{A1}, \dots, s_{CN} situées dans l'élément structurel et correspondant à des charges élémentaires émettant le champ électrique réfléchi au niveau de la face 1b. On calcule ensuite la valeur du
30 champ électrique aux points M de la couche de détection comme le champ électrique émis par ces sources par la

méthode DPSM.

Alternativement, on peut avoir recours à une modélisation DPSM de la couche d'émission 4, comme représenté sur les figures 10a et 10b. On modélise la
 5 couche d'émission 4 par des éléments comprenant chacun une sphère présentant trois éléments de courant dI de longueur δ , intersectant au centre G'_i de la base de la sphère pour y former un trièdre. L'orientation des trièdres est éventuellement variable d'un élément à l'autre, pour éviter
 10 des problèmes de surpériodicité. La longueur de chaque élément est liée au diamètre de la sphère et est calculée en fonction des conditions aux limites imposées par les spires conductrices présentes au niveau de la couche d'émission, ou plus généralement par la connaissance aux
 15 points P'_i du champ incident dû à un dispositif d'émission.

De même, le champ électrique incident au niveau de la face interne 1b est calculé par méthode DPSM à partir des valeurs des courants parcourant les éléments de courant. Puis, le champ électrique est calculé dans la
 20 couche de détection comme précédemment, à partir du coefficient de réflexion.

En résumé, on procède comme suit :

- après maillage des faces, on détermine la position des points P_i et des sources S_i ;
- 25 - on détermine les coefficients de la matrice $F(P)$;
- en fonction d'une loi de réflexion de l'obstacle, on détermine les coefficients de la matrice de réflexion R_a ;
- 30 - en fonction des conditions aux limites sur la face interne 1b, pour laquelle on peut calculer le champ électrique incident, on détermine les valeurs du vecteur $V(P)$ aux points P_i de la face interne 1b et on en déduit les valeurs des sources $S_{\Sigma i}$ de la face interne 1b ;
- 35 - une fois les valeurs de toutes les sources $S_{\Sigma i}$

déterminées, on peut appliquer le système matriciel donné par la relation 1 à tout point M de la couche de détection, en appliquant à ce point M la matrice d'interaction F (impliquant la position du point M et les positions des sources respectives $S_{\Sigma i}$).

Le modèle ainsi développé peut être utilisé conjointement au dispositif de contrôle intégré des structures 2 pour quantifier l'endommagement subi par la structure.

Pour ce faire, si l'on détecte que la structure a subi un endommagement, par exemple parce que l'on remarque une différence entre les composantes E_x et E_y mesurées du champ électrique au niveau de la couche de détection 5 avec les mêmes composantes de champ électrique mesurées précédemment, telles que lors d'une inspection précédente, ou par comparaison avec des valeurs contenues dans une base de données et établies lors de la fabrication de la structure, on peut procéder comme suit :

On part d'un modèle de la structure saine, contenu dans l'unité de commande 3, et établi par exemple lors de la mise en service de la structure. Ce modèle présente, à titre d'exemple, une conductivité électrique modélisée $\sigma^s_0 = 10^4 \text{ S.m}^{-1}$, et une permittivité diélectrique modélisée $\epsilon^s_{r0} = 4$, ou toutes autres valeurs préétablies pour la matrice et les fibres utilisées. On peut modifier le modèle simplement en modifiant la matrice de réflexion R_a , simplement en modifiant l'un ou l'autre desdits paramètres σ^s et ϵ^s_r au niveau de l'endommagement présumé subi par la structure (emplacement identifié par le dispositif de contrôle intégré de structure 2). Le modèle ainsi établi est représenté sur la figure 11, où une zone saine 28 entourant une zone endommagée 13 sont représentées schématiquement.

Un endommagement purement mécanique ayant peu

d'influence sur la composante E_y du champ électrique détecté (étant entendu avec l'orientation représentée sur les figures), on peut en particulier mettre en œuvre l'algorithme proposé à la figure 12.

5 En partant, en 14, d'une mesure de la composante E_y du champ électrique, on compare, en 15, cette composante E_{ym} à une valeur précédente de E^0_{ym} , par exemple obtenue lors d'un examen précédent, et contenue dans une base de données.

10 Si la différence $\Delta E_y = E_{ym} - E^0_{ym}$ est significative, par exemple supérieure à un seuil pré-établi ΔE_y^0 , on peut d'ores et déjà à ce stade conclure en 16 à un défaut d'origine non mécanique, à savoir chimique et/ou thermique pour la structure ayant entraîné une variation de la

15 permittivité diélectrique ϵ_r de la résine. En 17, on calcule la composante E_y du champ électrique pour le modèle de la structure présentant un défaut correspondant à une variation locale de la permittivité ϵ_r , en ayant par exemple fixé $\epsilon_{rd} = 2$. En 18, on compare la composante E_y

20 calculée en 17 pour ce modèle présentant un défaut avec la composante E_{ym} mesurée par le dispositif de contrôle intégré de structure 2. Si la différence entre ces deux valeurs est inférieure à un seuil prédéterminé, fixé par exemple par l'expérience, on en déduit la valeur ϵ_r de la

25 structure, en 19, comme étant celle utilisée dans le modèle en 17. Sinon, on modifie le modèle en 20 en modifiant localement la valeur de ϵ_{rd} affectée au défaut, et on ré-effectue le calcul en 17. On peut ainsi effectuer un certain nombre de calculs pour se rapprocher de la valeur

30 de permittivité diélectrique effectivement présente dans la structure au niveau du défaut, jusqu'à ce que la condition 18 soit enfin respectée.

En revenant au niveau de la comparaison 15 entre la valeur mesurée E_{ym} et une valeur mesurée précédemment de la

même composante, si on ne dénote pas de différences notables entre ces deux composantes, et qu'il existe néanmoins une différence entre la composante E_{xm} mesurée et une composante E_{xm}^0 mesurée précédemment pour la structure, on peut conclure en 21 à un défaut d'origine mécanique pour la structure. De même, on calcule, en 22, une composante E_x pour le modèle présentant un défaut d'origine mécanique, tel que par exemple une conductivité $\sigma_d^s = 10^2 \text{ S.m}^{-1}$, et on compare en 23 la composante calculée pour le modèle de la structure présentant un défaut et la composante mesurée. Si la différence entre la composante E_{xm} mesurée et la composante calculée pour le modèle de la structure présentant un défaut est inférieure à un certain seuil prédéterminé, on en déduit, en 24, que la valeur de la conductivité électrique de la structure en ce point est environ égale à la valeur de la conductivité électrique utilisée dans le modèle en 22. Sinon, on modifie, en 25, le modèle, en particulier en modifiant la valeur de la conductivité électrique σ_d au niveau du défaut, et on calcule à nouveau la composante E_x en 22, pour le modèle modifié. On peut ainsi réaliser un certain nombre d'itérations jusqu'à obtenir une composante E_x calculée proche de la composante mesurée E_{xm} du champ électrique, et en déduire la valeur de la conductivité électrique de la zone de la structure égale à la valeur de σ utilisée lors de la dernière itération du modèle.

Une fois la composante E_x identifiée avec succès en 23, on peut vérifier que la structure ne présente pas en plus un défaut d'origine chimique et/ou thermique. Pour ce faire, on compare, en 29, la composante E_y calculée pour le défaut d'origine mécanique à la composante E_{ym} mesurée. En cas de différence, on calcule la permittivité diélectrique de l'élément structurel sous test de la même manière que précédemment (17 - 19).

On peut en outre disposer d'une base de données

dans laquelle, pour une structure équivalente à la structure sous tests, on a mesuré, pour des défauts suite à des apports contrôlés d'énergie de nature mécanique, chimique et/ou thermique, les modifications résultantes de la conductivité électrique σ et/ou de la permittivité diélectrique ϵ_r respectivement. A partir des valeurs obtenues en 19 et 24, on peut ainsi remonter, à l'aide de cette base de données, à l'énergie subie par la structure, et en déduire l'énergie reçue par la structure. On peut ainsi déterminer de manière objective si le seuil de tolérance pour la structure n'est pas atteint, ou s'il est essentiel d'envisager une réparation et/ou un remplacement.

II/ Dans ce qui précède, les calculs ont été effectués à l'extérieur de l'élément structurel, celui-ci n'influant le calcul que par la matrice R_a de réflexion à sa surface. Néanmoins, on peut utiliser la méthode DPSM pour représenter plus précisément les phénomènes physiques internes à la structure. Dans ce cas, on reprend la figure 6a et la figure 8 dans lesquelles la surface b correspond à la face interne 1b de l'élément structurel 1, la surface a correspond à la face externe 1a de l'élément structurel 1, et le milieu correspond à l'élément structurel 1, considéré comme homogène dans son épaisseur. Une portion du champ électrique incident sur la face interne 1b, calculé analytiquement comme précédemment, est transmise dans l'élément structurel 1. On calcule le champ transmis dans l'élément structurel en appliquant un coefficient de transmission T (lié au rapport entre l'onde transmise et l'onde incidente alors que le coefficient de réflexion R est lié au rapport entre l'onde réfléchie et l'onde transmise) au champ incident calculé analytiquement ou par DPSM comme précédemment. Les sources initiales S'^0_{xi} correspondent à des sources émettant dans l'élément structurel la portion transmise du champ électrique incident sur la face 1b depuis la couche d'émission 4. Les

sources initiales S_{zi}^0 sont elles nulles, puisqu'on ne dispose pas d'une couche d'émission sur la face externe 1a de l'élément structurel. On calcule les sources effectives S_{zi} et S'_{zi} par la formule [14] et le champ électrique en tout point du milieu par la formule [15], en choisissant un nombre de réflexions approprié. Lors des réflexions multiples, l'onde incidente sur la face interne 1b depuis l'intérieur de l'élément structurel 1 est également partiellement transmise. Finalement, le champ électrique dans la couche de détection est calculé comme en relation avec la figure 9, à l'aide de sources de champ électrique émettant vers la couche de détection le champ électrique transmis vers la couche de détection à partir du champ incident sur la face 1b depuis l'intérieur de la structure 1, et du coefficient local de transmission T' de l'élément structurel vers l'extérieur. On applique ensuite le calcul d'optimisation présenté en relation avec les figures 11 et 12.

III/ La méthode DPSM permet également de réaliser une tomographie dans l'épaisseur de la structure 1. En particulier, la structure 1 étant une structure multicouches, on peut découper la structure modélisée en autant de couches que l'élément structurel 1, afin de qualifier chaque couche. Il n'y a néanmoins pas nécessairement de lien entre le découpage en couches de l'élément structurel 1 et celui du modèle.

On se réfère à la figure 13 pour l'analyse de ce mode de réalisation.

Dans un premier temps, on excite la structure par un courant à une fréquence élevée adaptée pour solliciter la structure principalement en surface. On choisit par exemple une fréquence telle que l'atténuation du champ dans la structure entre la face interne 1b et l'autre face 1c de la couche superficielle modélisée soit suffisante pour qu'on puisse négliger l'influence des couches situées sous

la couche superficielle (par exemple une atténuation environ égale à 10).

On effectue les étapes du I/ ou du II/ pour la seule couche superficielle. A ce titre, la surface a de la figure 6a est alors la face 1c de l'élément structurel 1. On obtient ainsi les valeurs de conductivité σ et permittivité ϵ_r au niveau de la couche superficielle.

Puis, on excite la structure à une fréquence inférieure, de sorte que l'atténuation d'un facteur par exemple 10 soit par exemple obtenue entre la face 1b et une face 1d encore plus profonde de la structure. En reprenant le calcul du I/ ou du II/ pour la partie de l'élément structurel comprise entre les faces 1b et 1d, on obtient une information sur les valeurs de conductivité σ et permittivité ϵ_r pour ces deux couches cumulées. A l'aide du calcul précédent des valeurs de conductivité σ et permittivité ϵ_r dans la couche superficielle, on déduit ces valeurs pour la seule couche intermédiaire comprise entre les faces 1c et 1d.

On continue ainsi en abaissant la fréquence successivement, pour obtenir pour chaque nouvelle couche, les valeurs de conductivité σ et permittivité ϵ_r recherchées.

Bien entendu, on peut ne vouloir rechercher qu'une seule de ces valeurs, et on pourrait, à cet effet, ne mesurer et calculer que l'une des deux composantes E_x ou E_y , n'en déduire qu'une composante ϵ_r ou σ en appliquant la branche de gauche ou la branche de droite de l'algorithme de la figure 12.

Alternativement, on pourra commencer par une fréquence basse pour obtenir une vision d'ensemble de la structure, puis augmenter petit à petit la fréquence pour obtenir des informations sur les couches successives de plus en plus proches de la couche d'émission 4.

D'autres variantes sont possibles, comme par

exemple de scanner la structure d'abord en augmentant la fréquence par étapes successives puis en la réduisant jusqu'à sa valeur initiale, ou autres.

Selon une variante, le dispositif de contrôle
5 intégré des structures n'est pas nécessairement fixé sur une face interne 1b ou externe 1a, mais peut être inséré dans la structure, auquel cas les calculs précédents devront être réalisés en sommant les résultats fournis pour les deux portions de structure séparées par le dispositif,
10 présentant chacune une matrice de réflexion et de transmission.

Ainsi l'unité centrale 3 est d'une part adaptée pour commander l'excitation des pistes conductrices 9 de la couche d'émission 4, des pistes conductrices 12 de la
15 couche de détection 5, la commutation des interrupteurs 11, et le traitement du signal détecté, et comprend d'autre part des moyens de calcul comprenant des moyens de mémoire pouvant contenir un modèle de la structure étudiée, des moyens d'estimation des composantes E_x et E_y , des moyens de
20 comparaison de ces valeurs avec les mesures, des moyens de générer un modèle modifié. Enfin, l'unité centrale peut comprendre une base de données de résultats antérieurs pour la structure sous test ou des résultats obtenus pour une ou plusieurs structures similaires. Certains de ces éléments
25 peuvent en outre être placés sur un support d'informations tel un CD-ROM, un DVD-ROM, ou autre, apte à être lu par un ordinateur.

Les informations fournies par le procédé et le dispositif selon l'invention pourront aussi être utilisées
30 conjointement à celles fournies par le dispositif de contrôle intégré des structures SMART-layer de la société Acellent à technologie de capteurs piézo-électriques, dont l'aptitude à détecter des défauts d'origine mécanique est reconnue.

35 Le procédé et le dispositif ci-décrits ne sont pas

exclusivement cantonnés à une utilisation pour des structures composites comprenant d'une part une matrice constituée d'un matériau diélectrique et, d'autre part, de fibres de carbone présentant une conductivité électrique.

5 On peut par exemple utiliser le dispositif et le procédé selon l'invention pour une structure sandwich, telle que représentée sur la figure 14, purement diélectrique. Dans ce cas, il n'est bien sûr pas question de déterminer une quelconque conductivité électrique σ pour les fibres de
10 carbone, mais le dispositif selon l'invention peut être utilisé pour déterminer la permittivité diélectrique ϵ_r de l'élément structurel 1. Celui-ci peut par exemple être constitué d'une ou plusieurs couches 26 de résine renforcée par des fibres de verre, et d'un noyau 27 disposé entre ces
15 couches. Dans ce cas, le dispositif de contrôle intégré des structures ne fonctionne plus selon une technologie hybride, mais selon une méthode purement électrique, dans laquelle la couche d'émission 4 est modifiée pour générer, non plus un champ magnétique, mais un champ électrique E.
20 Ceci est réalisé très simplement en ouvrant les interrupteurs 11 (figure 4) reliant précédemment les pistes conductrices 9a et 9b, de manière à générer successivement dans chacune des pistes conductrices 9a, 9b,... un champ électrique.

25 L'algorithme de résolution des figures 8 et 9 n'est plus utilisé que pour déterminer la valeur ϵ_r de la permittivité diélectrique de la structure instrumentée. Dans ces conditions, on peut ne plus mesurer la composante E_x du champ électrique détecté, et on peut se contenter
30 d'une couche de détection orientée le long de la direction Y, telle que celle représentée en 5a sur la figure 5a.

Bien entendu, les couches d'émission et de détection 4, 5, peuvent être situées sur la face interne 1b de l'élément structurel 1 sandwich, ou sur sa face externe,
35 ou être dissociées pour être placées respectivement à

différents niveaux dans l'épaisseur de l'élément structurel
1.

Revendications

1. Dispositif de contrôle de l'état de santé d'une zone d'un élément structural comprenant au moins un
5 matériau diélectrique de permittivité diélectrique ϵ_r ,
comprenant :

(A) des moyens d'émission de rayonnement électromagnétique s'étendant dans une direction, ledit champ électromagnétique générant un champ électrique dans
10 la zone, et

(B) des moyens de détection adaptés pour mesurer une première composante mesurée d'un champ électrique, le long d'une première direction de détection,

caractérisé en ce que ledit dispositif comprend en
15 outre des moyens de calcul (C) adaptés pour obtenir une valeur de la permittivité diélectrique ϵ_r en ladite zone à partir de ladite première composante mesurée.

2. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel ledit élément structural est un élément structural
20 inhomogène comprenant en outre un matériau imparfaitement conducteur, de conductivité électrique σ ,

dans lequel les moyens d'émission sont des moyens d'émission de rayonnement magnétique adaptés pour générer un champ magnétique, ledit champ magnétique étant, au
25 niveau de la zone, équivalent à un champ magnétique émis par un dipôle magnétique s'étendant dans ladite direction,

et dans lequel les moyens de calcul (C) sont alternativement ou en outre adaptés pour obtenir une valeur de la conductivité électrique σ en ladite zone à partir de
30 ladite première composante mesurée.

3. Dispositif selon la revendication 2, dans lequel lesdits moyens de détection sont adaptés pour mesurer en outre une deuxième composante mesurée dudit champ électrique, le long d'une deuxième direction de
35 détection formant avec ladite première direction de

détection un angle non nul,

et dans lequel, les moyens de calcul sont adaptés pour obtenir une valeur de la conductivité électrique σ et de la permittivité électrique ϵ_r en ladite zone à partir de ladite première et ladite deuxième composantes mesurées.

4. Dispositif selon la revendication 3, dans lequel une direction choisie parmi la première et la deuxième direction de détection est ladite direction de moyens d'émission.

10 5. Dispositif selon la revendication 2, dans lequel lesdits moyens d'émission comprennent une couche comprenant, au niveau de ladite zone, au moins deux pistes conductrices parallèles, orientées le long de ladite direction de dipôle et adaptées pour pouvoir être
15 parcourues en sens inverse l'une de l'autre par un courant électrique.

6. Dispositif selon la revendication 3, dans lequel lesdits moyens de détection comprennent une couche comprenant, au niveau de ladite zone, au moins une piste
20 conductrice orientée le long de ladite première direction de détection, et une couche comprenant, au niveau de ladite zone, au moins une piste conductrice orientée le long de la dite deuxième direction de détection.

7. Dispositif selon la revendication 2, dans
25 lequel les moyens de calcul comprennent :

(Z) des moyens de mémoire adaptés pour contenir un modèle de la zone par au moins deux paramètres numériques liés à σ^s représentant ladite conductivité électrique σ en cette zone, et ϵ_r^s représentant ladite permittivité diélectrique en cette zone, et un modèle desdits moyens
30 d'émission,

(E) des moyens d'estimation adaptés pour estimer une composante simulée d'un champ électrique simulé généré dans ledit modèle de la zone par ledit modèle de moyens
35 d'émission, le long de ladite première direction de

détection, et

(F) des moyens de comparaison adaptés pour comparer ladite composante simulée et ladite composante mesurée correspondante obtenue par les moyens de détection (B).

5 8. Dispositif selon la revendication 3, dans lequel les moyens de calcul comprennent :

(Z) des moyens de mémoire adaptés pour contenir un modèle de la zone par au moins deux paramètres numériques liés à σ^s représentant ladite conductivité électrique σ en
10 cette zone, et ϵ_r^s représentant ladite permittivité diélectrique en cette zone, et un modèle desdits moyens d'émission,

(E) des moyens d'estimation adaptés pour estimer une première et une deuxième composante simulée dudit champ
15 électrique simulé le long desdites première et deuxième directions de détection, et

(F) des moyens de comparaison adaptés pour comparer lesdites composantes simulées et lesdites composantes mesurées correspondantes obtenues par les moyens de
20 détection (B).

9. Dispositif selon la revendication 7 comprenant en outre (D) des moyens de génération adaptés pour générer ledit modèle contenu dans les moyens de mémoire (Z).

10. Dispositif selon la revendication 2, comprenant
25 en outre

(G) une base de données contenant des données relatives à une énergie absorbée par un élément structural présentant une conductivité électrique σ et une permittivité diélectrique ϵ_r pour lesdits matériaux.

30 11. Dispositif selon la revendication 2, comprenant en outre une couche de contrôle intégré des structures à technologie piézo-électrique.

12. Dispositif selon la revendication 1 dans lequel ledit élément structural ne comprend pas de matériau
35 imparfaitement conducteur,

et dans lequel les moyens d'émission sont des moyens d'émission de rayonnement électrique adaptés pour générer un champ électrique s'étendant dans ladite direction.

5 13. Structure adaptée pour un contrôle de l'état de santé d'une zone d'un élément structurel de ladite structure, et comprenant :

 ledit élément structurel comprenant au moins un matériau diélectrique de permittivité diélectrique ϵ_r ,

10 une couche d'émission de rayonnement électromagnétique s'étendant dans une direction, ledit champ électromagnétique générant un champ électrique dans la zone,

 une couche de détection adaptée pour mesurer une
15 première composante mesurée d'un champ électrique, le long d'une première direction de détection, et

 au moins un organe de connexion à des moyens de calcul adaptés pour obtenir une valeur de la permittivité diélectrique ϵ_r en ladite zone à partir de ladite première
20 composante mesurée.

 14. Structure selon la revendication 13 dans laquelle ledit élément structurel est un élément structurel inhomogène comprenant en outre un matériau imparfaitement conducteur, de conductivité électrique σ ,

25 dans lequel les moyens d'émission sont des moyens d'émission de rayonnement magnétique adaptés pour générer un champ magnétique, ledit champ magnétique étant, au niveau de la zone, équivalent à un champ magnétique émis par un dipôle magnétique s'étendant dans ladite direction,

30 et dans lequel les moyens de calcul (C) sont alternativement ou en outre adaptés pour obtenir une valeur de la conductivité électrique σ en ladite zone à partir de ladite première composante mesurée.

 15. Structure selon la revendication 13, ledit
35 élément structurel se présentant sous la forme d'au moins

une couche, ladite couche de détection étant comprise entre ladite couche d'élément structurel et ladite couche d'émission.

16. Structure selon la revendication 13, ledit
5 élément structurel se présentant sous la forme d'au moins une couche, ladite couche d'émission étant comprise entre ladite couche d'élément structurel et ladite couche de détection.

17. Structure selon la revendication 13, ledit
10 élément structurel se présentant sous la forme d'au moins une couche, ladite couche d'élément structurel étant comprise entre ladite couche d'émission et ladite couche de détection.

18. Structure selon la revendication 14, ledit
15 élément structurel inhomogène se présentant sous la forme d'au moins une couche fine comprenant au moins un matériau imparfaitement conducteur sous la forme d'au moins une fibre de carbone, de conductivité électrique σ , et un matériau diélectrique sous la forme d'une matrice, dans
20 laquelle sont noyées lesdites fibres de carbone, de permittivité diélectrique ϵ_r .

19. Procédé de contrôle de l'état de santé d'une zone d'un élément structurel comprenant au moins un matériau diélectrique de permittivité diélectrique ϵ_r ,
25 comprenant les étapes au cours desquelles :

(a) on génère un champ électromagnétique, par des moyens d'émission de rayonnement électromagnétique s'étendant dans une direction, ledit champ électromagnétique générant un champ électrique dans la
30 zone, et

(b) on mesure une première composante mesurée d'un champ électrique, le long d'une première direction de détection,

caractérisé en ce que le procédé comprend en outre
35 une étape (c) au cours de laquelle on obtient une valeur de

la permittivité diélectrique ϵ_r en ladite zone à partir de ladite première composante mesurée.

20. Procédé selon la revendication 19, dans lequel ledit élément structural est un élément structural inhomogène comprenant en outre un matériau imparfaitement conducteur, de conductivité électrique σ ,

dans lequel, au cours de l'étape (a), on génère un champ magnétique par des moyens d'émission de rayonnement magnétique, ledit champ magnétique étant, au niveau de la zone, équivalent à un champ magnétique émis par un dipôle magnétique s'étendant dans ladite direction,

et dans lequel au cours de l'étape (c), on obtient alternativement ou en outre une valeur de la conductivité électrique σ en ladite zone à partir de ladite première composante mesurée.

21. Procédé selon la revendication 19, dans lequel, au cours d'une première itération, on effectue les étapes (a) à (c) pour une première fréquence des moyens d'émission,

au cours d'une deuxième itération, on répète les étapes (a), (b), et (c) pour une deuxième fréquence, et

au cours de l'étape (c) de la deuxième itération, on prend en compte la valeur obtenue au cours de l'étape (c) d'une itération précédente.

22. Procédé selon la revendication 20, dans lequel, au cours de chaque étape (b), on mesure en outre une deuxième composante mesurée dudit champ électrique, le long d'une deuxième direction de détection formant avec ladite première direction un angle non nul,

et dans lequel, au cours de l'étape (c) de chaque itération, on prend en compte lesdites première et deuxième composantes mesurées.

23. Procédé selon la revendication 20, dans lequel, au cours de l'étape (c), pour chaque itération,

disposant, dans des moyens de mémoire, d'un modèle

initial de la zone par au moins deux paramètres numériques liés à σ^s représentant ladite conductivité électrique σ en cette zone, et ϵ_r^s représentant ladite permittivité diélectrique en cette zone, et un modèle desdits moyens
 5 d'émission,

(e) on estime au moins une première composante simulée d'un champ électrique simulé généré dans ledit modèle de la zone par ledit modèle de moyens d'émission, le long d'une direction de détection choisie parmi lesdites
 10 première et deuxième direction de détection, et

(f) on compare ladite composante simulée et ladite composante mesurée correspondante obtenue au cours de l'étape (b).

24. Procédé selon la revendication 23, comprenant
 15 en outre, antérieurement à l'étape (e) une étape (d) dans laquelle on génère, dans les moyens de mémoire, un modèle initial de la zone par au moins deux paramètres numériques liés à σ^s représentant ladite conductivité électrique σ en cette zone, et ϵ_r^s représentant ladite permittivité
 20 diélectrique en cette zone, et un modèle desdits moyens d'émission.

25. Procédé selon la revendication 23, dans lequel, au cours de l'étape (b), on mesure une deuxième composante mesurée dudit champ électrique, le long de l'autre
 25 direction de détection,

dans lequel, au cours de l'étape (e), on estime une deuxième composante simulée correspondante dudit champ électrique simulé,

et dans lequel, au cours de l'étape (f), on compare
 30 ladite deuxième composante simulée et ladite deuxième composante mesurée obtenue au cours de l'étape (b).

26. Procédé selon la revendication 23, dans lequel, postérieurement à l'étape (f), on met en outre en œuvre l'étape (d') dans laquelle on génère un modèle modifié de
 35 la zone par au moins deux paramètres numériques liés à σ^s

représentant ladite conductivité électrique σ en cette zone, et ϵ_r^s représentant ladite permittivité diélectrique en cette zone, différent du modèle initial par au moins l'un des paramètres numériques, et on met en œuvre les
 5 étapes (e) et (f) pour ledit modèle modifié.

27. Procédé selon la revendication 23, dans lequel l'étape (c) comprend en outre une étape (g) au cours de laquelle on détermine au moins une caractéristique de la zone choisie parmi la conductivité σ et la permittivité ϵ_r
 10 en identifiant ladite conductivité simulée σ^s à ladite conductivité et/ou ladite permittivité simulée ϵ_r^s à ladite permittivité, dès lors que la comparaison effectuée à l'étape (f) donne un résultat satisfaisant.

28. Procédé selon la revendication 20, comprenant
 15 en outre une étape au cours de laquelle

(h) on détermine une énergie absorbée par ledit élément structural présentant ladite conductivité électrique σ et/ou ladite permittivité diélectrique ϵ_r obtenues à l'étape (c) par inférence sur une base de
 20 données contenant des données concernant une énergie absorbée par un élément structural présentant une conductivité électrique σ et une permittivité diélectrique ϵ_r pour lesdits matériaux.

29. Procédé selon la revendication 20 dans lequel
 25 ledit élément structural ne comprend pas de matériau électriquement conducteur, même imparfaitement, dans lequel, au cours de l'étape (a), on génère dans la zone, à l'aide de moyens d'émission de rayonnement électrique, un champ électrique dans ladite direction.

30. Procédé selon la revendication 29, dans lequel,
 30 au cours de l'étape (c),

disposant, dans des moyens de mémoire (3), d'un modèle initial de la zone par au moins un paramètre numérique lié à ϵ_r^s représentant ladite permittivité
 35 diélectrique en cette zone, et un modèle desdits moyens

d'émission,

(d) on estime une composante simulée d'un champ électrique simulé induit dans ledit modèle de la zone par ledit modèle de moyens d'émission, et

- 5 (e) on compare ladite composante simulée et ladite composante mesurée correspondante obtenue au cours de l'étape (b).

Dispositif et procédé de contrôle de l'état de santé d'une
zone d'un élément structurel, et structure adaptée pour un
contrôle de l'état de santé d'une zone d'un élément
structurel de ladite structure

ABREGE

Dispositif de contrôle de l'état de santé d'une structure comprenant un matériau diélectrique de permittivité ϵ_r , comprenant

une source de rayonnement électromagnétique, générant un champ électrique dans la structure

un détecteur mesurant une composante du champ électrique,

des moyens de calcul donnant la valeur de ϵ_r à partir de ladite composante.

FIGURE 2